Iranian Journal of Crystallography and Mineralogy
OPEN ACCESS JOURNAL

مقاله پژوهشی

مجله بلورشناسی وکانی شناسی ایران
سال سی و دوم، شمارۀ دوم، تابستان ۱۴۰۳، از صفحۀ ۲۷۵ تا ۲۸۶

زمین شناسی، کانی سازی و ویژگی‌های میان‌بارهای سیال در کانسار کجه، شمال غرب فردوس، خراسان جنوبی

صدیقه زیرجانی زاده*، روح اله میری بیدختی

گروه زمین شناسی، دانشکده علوم، مجتمع آموزش عالی گناباد، گناباد، ایران

(دریافت مقاله: ۱۴۰۲/۵/۲۴، نسخه نهایی: ۱۴۰۲/۹/۶)

چکیده: منطقه اکتشافی کجه در ۴۵ کیلومتری شمال غرب فردوس و شمال قطعه لوت قرار دارد. زمین‌شناسی این منطقه شامل واحد آهک کرتاسه به عنوان قدیمیترین واحد، سنگ‌های آتشفشانی با ترکیب آندزیت و ریولیت و توده‌های نیمه‌عمیق با ترکیب دیوریت پورفیری است. پهنه‌های دگرسانی پروپیلیتیک، سیلیسی و آرژیلیک پیرامون رگه و سنگ‌های میزبان اطراف وجود دارند. کانی‌های سولفیدی شامل پیریت، گالن و اسفالریت و کانی‌سازی ثانویه شامل کوولیت، مالاکیت، آزوریت، کریزوکولا، همی مورفیت و اکسیدهای آهن هستند. مقدار متوسط سرب ۲/۱۴ و مقدار متوسط روی در رگه‌ها ۴/۴۰ است. بر اساس بررسی سیال‌های درگیر، دمای تشکیل کانسار بین ۲۰۴ تا ۳۲۱ درجه سانتیگراد بوده و از محلولی با درجه شوری ۶/۲ تا ۱۵ درصد به وجود آمده است. فرایندهای جوشش، آمیختگی سیال‌ها و رقیق‌شدگی آنها بر اثر مخلوط شدن آب‌های جوی با سیال‌های ماگمایی عوامل اصلی تشکیل سیال‌های کانه‌ساز در این کانسار هستند. فشار سیال‌ها طی تشکیل کانسنگ از کمتر از ۱۰۰ تا کمی بیش از ۱۵۰ بار متغیر است و ژرفای تشکیل کانسار کجه حدود ۷۰۰ متر از سطح ایستابی برآورد می‌شود.

واژه‌های کلیدی: *رب؛ روی؛ سیالات درگیر؛ کجه؛ فردوس.*

مقدمه

کانسار سرب و روی کجه در۴۰ کیلومتری شمال غرب فردوس، شمال استان خراسان جنوبی و در گستره مختصاتی بین طول-های "17'48°57 تا "08'49°57 شرقی و عرض‌های جغرافیایی "57'10°34 تا "43'11°34 شمالی واقع است (شکل ۱). منطقه بررسی شده در شرق ایران و در بخش شمالی قطعه لوت قرار دارد (شکل ۱). از ویژگی‌های بی‌مانند قطعه لوت، فعالیت-های ماگمایی آن بوده که از ژوراسیک آغاز شده و در ترشیاری به اوج خود رسیده است، بطوری که سنگ‌های آتشفشانی-نفوذی ترشیاری، بویژه ائوسن، بیش از نیمی از قطعه لوت را می‌پوشانند. قطعه لوت با داشتن موقعیت‌های زمین‌ساختی مختلف در زمان‌های گذشته و در پی آن وجود حجم بالای فعالیت‌های ماگمایی با ویژگی‌های زمین‌شیمیایی متفاوت، دارای پتانسیل مناسبی برای تشکیل کانی‌سازی‌های فلزی و غیر فلزی مختلف است [۱]. از جمله پتانسیل‌های معدنی قطعه لوت، می‌توان به کانی‌سازی‌های مس (معدن مس-سرب-روی-نقره قلعه‌زری بیرجند) و مس- طلای پورفیری (منطقه اکتشافی شادان و ماهرآباد)، طلای فراگرمایی (منطقه اکتشافی هیرد و شیخ‌آباد)، کانی‌سازی طلا و نقره فراگرمایی سولفید بالا در گستره اکتشافی بالازرد و کانی‌سازی رگه‌ای مس- سرب و روی ماهور اشاره نمود [۲-۱۴].

براساس بررسی‌های نجفی و همکاران [۱۵]، توده‌های نفوذی منطقه کجه از نوع گرانیتوئیدهای اکسایشی و وابسته به سری مگنتیت و دارای سن ۶۷ تا ۸۴ میلیون سال یعنی اواخر کرتاسه هستند. توده‌های نفوذی عمیق و نیمه عمیق ترشیاری قطعه‌لوت در گستره‌ای وسیع بررسی شده‌اند. این توده‌ها بیشتر از نوع گرانیتوئیدهای اکسایشی و از سری مگنتیت هستند. ترکیب آنها از دیوریت تا گرانیت متغیر است، ولی اغلب

*نویسنده مسئول، تلفن: ۰۹۱۵۳۵۹۵۸۹۶، پست الکترونیکی: szirjanizadeh@yahoo.com

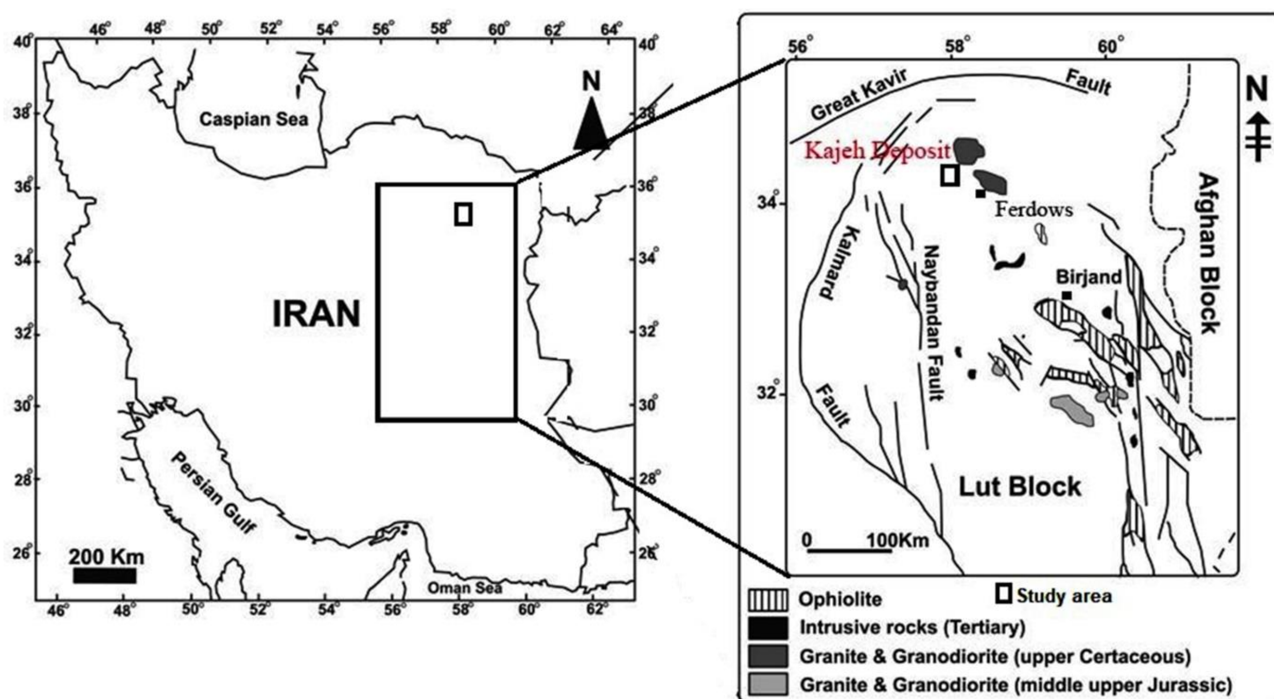
[DOI: 10.61186/ijcm.32.2.275]

مونزونیتی هستند. این توده‌ها آهکی قلیایی، بیشتر از نوع متاآلومین و غنی از پتاسیم هستند و در کمربند پهنه فرورانش تشکیل شده‌اند. ذخیره قطعی تایید شده این کانسار براساس عملیات اکتشافی انجام شده، دویست و شصت و یک هزار تن کانسنگ سرب و روی با عیار ۴/۷ درصد روی و ۱/۸ درصد سرب است؛ البته پی‌جویی‌های تکمیلی در گستره معدن درحال انجام است.

روش بررسی

فعالیت‌های این پژوهش بر اساس بازدیدهای صحرایی و نمونه‌برداری، بررسی های آزمایشگاهی و تجزیه نمونه‌ها بوده است. در بخش صحرایی، همه ویژگی‌های ساختی، بافتی و چگونگی ارتباط پدیده‌ها بررسی شد. بیش از ۳۰ نمونه از واحدهای سنگی و کانی‌سازی برداشت گردید. در مجموع تعداد ۲۰ مقطع نازک و ۵ مقطع قطعه صیقلی از واحدهای سنگی و رگه‌های کانی‌سازی (از سطح رخنمون‌ها و ترانشه‌ها) به‌منظور بررسی‌های سنگ‌شناسی، دگرسانی و کانی‌سازی تهیه شد. نقشه زمین‌شناسی- دگرسانی با مقیاس ۱:۵۰۰۰ از منطقه مورد بررسی با نرم افزار ArcGIS تهیه گردید. برای بررسی‌های تکمیلی در زمینه کانی شناسی، تعداد شش نمونه انتخاب و به روش پراش پرتوی ایکس(XRD) در آزمایشگاه زرآزمای تهران بررسی شدند. همچنین ۳۳ نمونه از کانسنگ، برای تجزیه عناصر اصلی سرب و روی به روش جذب اتمی بررسی گردیدند.

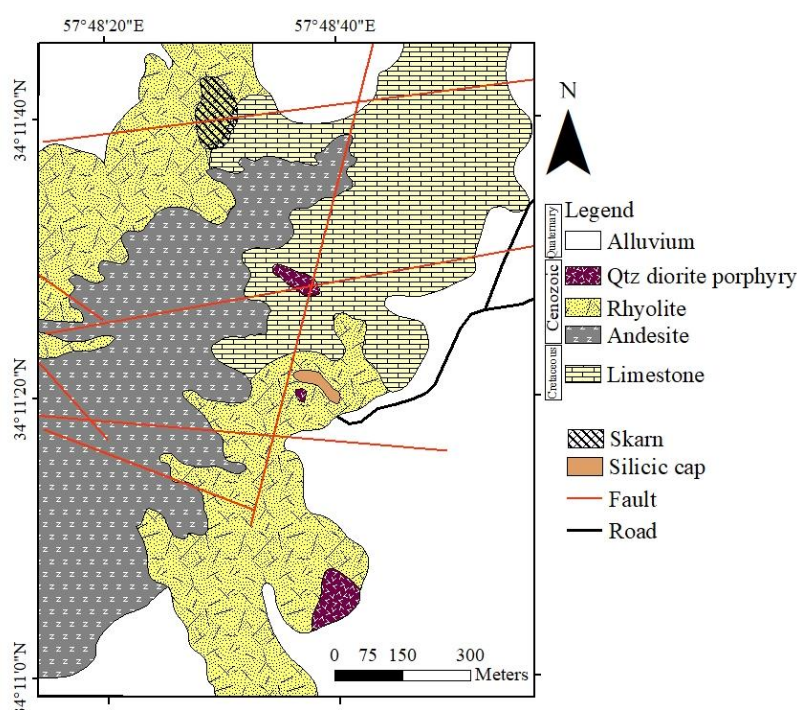
اندازه‌گیری‌های ریز دماسنجی میانبارهای سیال درون بلورهای کوارتز منطقه بر اساس تغییرات فازی درون میانبار طی سرد کردن و گرم‌کردن انجام شد. در دانشگاه تربیت مدرس تهران، پارامترهای دمایی با ریزدماسنج لینکام مدل THMS600 نصب بر میکروسکوپ زایس Axioplan اندازه‌گیری شدند. شوری در میانبارهای دوفازی با برنامه Package Fluids به روش مرجع [۱۶] برآورد گردید. ویژگی‌های میان‌بارهای سیال در دمای اتاق بر پایه معیارهای مراجع [۱۷] و [۱۸] ثبت شد. همچنین نسبت‌های فاز بخار به سیال (V/L) براساس جدول استاندارد پیشنهادی شفرد و همکاران [۱۸] ارزیابی شد.



شکل ۱ موقعیت منطقه اکتشافی کجه بر نقشه ایران [۱۹] و پهنه ساختاری قطعه لوت.

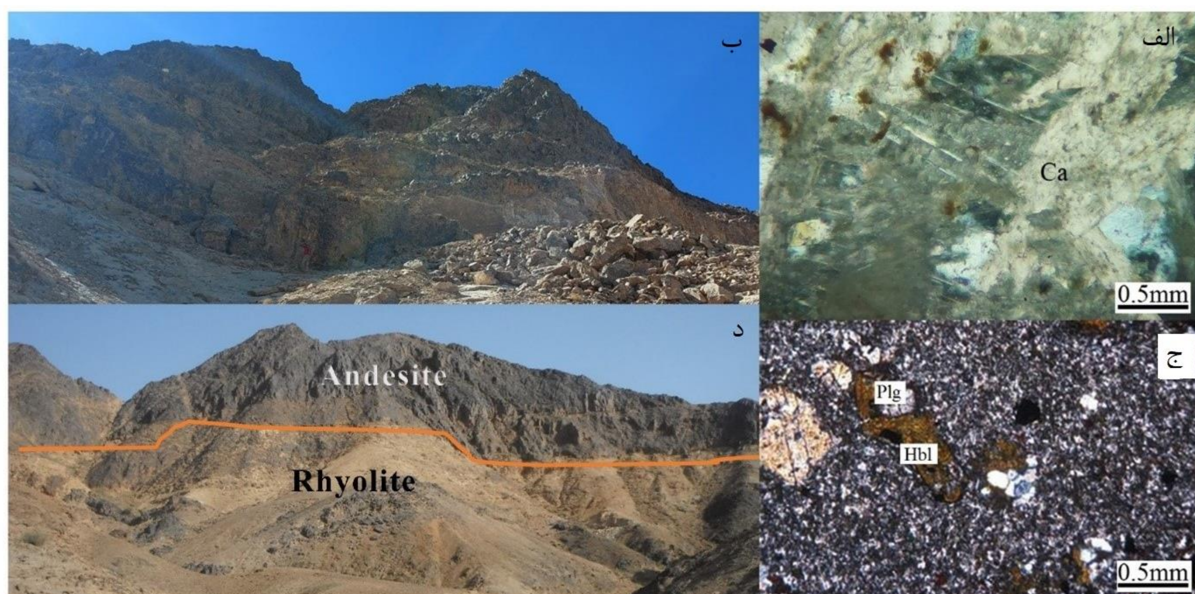
زمین شناسی

رخداد معدنی کجه از نظر موقعیت جغرافیایی در ۴۰ کیلومتری شمال غرب فردوس و در بخش مرکزی نقشه زمین شناسی ۱:۱۰۰۰۰۰ طاهرآباد [۱] واقع است. قدیمیترین واحد سنگی در منطقه مورد بررسی واحد آهک کرتاسه است که در شمال و شرق منطقه بصورت ارتفاع‌هایی رخنمون دارد (شکل ۲) و از آنجا که میزبان کانی سازی است اهمیت بالایی دارد. بررسی مقطع نازک میکروسکوپی این واحد نشان می دهد که همه آن از کانی های کربناتی به ویژه کلسیت با اندازه ۰/۱ تا ۰/۳ میلیمتر تشکیل داده است (شکل‌های ۲، ۳ الف وب). واحد آندزیتی در بخش غربی منطقه اکتشافی کجه رخنمون دارد (شکل ۲) و در نمونه دستی به رنگ خاکستری تا مایل به سیاه است. برونزد این واحد روی سایر واحدهای سنگی منطقه قرار دارد (شکل ۳ ت). این واحد دارای بافت پورفیری است. فراوانی کانی‌های درشت بلور حدود ۲۰-۲۵ درصد است. درشت بلورها شامل تا ۲۰ درصد پلاژیوکلاز به صورت شکل‌دار تا نیمه‌شکل-دار با اندازه ۰/۳ تا ۱ میلیمتر و ۵ تا ۱۰ درصد کانی آمفیبول، نیمه شکل‌دار تا بی‌شکل، با اندازه ۰/۱ تا ۰/۳ میلیمتر هستند. زمینه از بلورهای پلاژیوکلاز و کانی‌های کدر تشکیل شده است. کانی‌های ثانویه شامل کلسیت و کلریت هستند که از دگرسانی پلاژیوکلازها و هورنبلند تشکیل شده‌اند (شکل ۳ پ). این واحد ارتباطی با کانی‌سازی ندارد. سنگ‌های آتشفشانی ریولیت که توده‌های نیمه‌عمیق و عمیق در آن‌ها نفوذ کرده‌اند، بخش بزرگی از منطقه را می‌پوشانند (شکل ۲). به سبب نفوذ توده-های نیمه‌عمیق در ارتباط با کانی‌سازی و اثر محلول‌های ماگمایی-گرمابی کانه‌دار، این سنگ‌های آتشفشانی بشدت دگرسان شده‌اند و در بخشهایی، دگرسانی آرژیلیکی بحدی رسیده است که ماده معدنی کائولین شکل گرفته و در حال استخراج است. همچنین این واحد سیلیسی شده است و در بخشهایی از منطقه بصورت رگه و کلاهک سیلیسی برونزد دارد (شکل ۲). کوارتز دیوریت پورفیری با سه رخنمون کوچک در بخش مرکزی نقشه دیده می‌گردد (شکل ۲) و دارای بافت پورفیری است. فراوانی درشت بلورها حدود ۳۵ تا ۴۰ درصد است. کانی‌های درشت بلور شامل ۳۰-۲۵ درصد پلاژیوکلاز با اندازه ۲ تا ۵ میلیمتر ، ۵تا۶ درصد کوارتز با اندازه ۰/۱ تا ۰/۵ میلیمتر و ۲ تا۳ درصد هورنبلند با اندازه ۰/۵ تا ۲ میلیمتر هستند. کانی‌های زمینه سنگ نیز پلاژیوکلاز و کوارتز هستند. کانی‌های کدر شکل‌دار تا نیمه شکل‌دار هستند و مقدار آنها تا ۲ درصد است. پلاژیوکلازها بصورت جزئی به اپیدوت و کانی هورنبلند به کلریت دگرسان شده‌اند.



شکل۲ نقشه زمین شناسی منطقه کجه.

[DOI: 10.61186/ijcm.32.2.275]



شکل ۳ الف و ب) تصویر میکروسکوپی از واحد آهکی و برونزد آن در شمال منطقه کجه (دید به سمت شرق)، پ و ت) قرار گرفتن واحد آندزیتی در بالای واحد ریولیتی و تصویر میکروسکوپی از واحد آندزیت.

دگرسانی

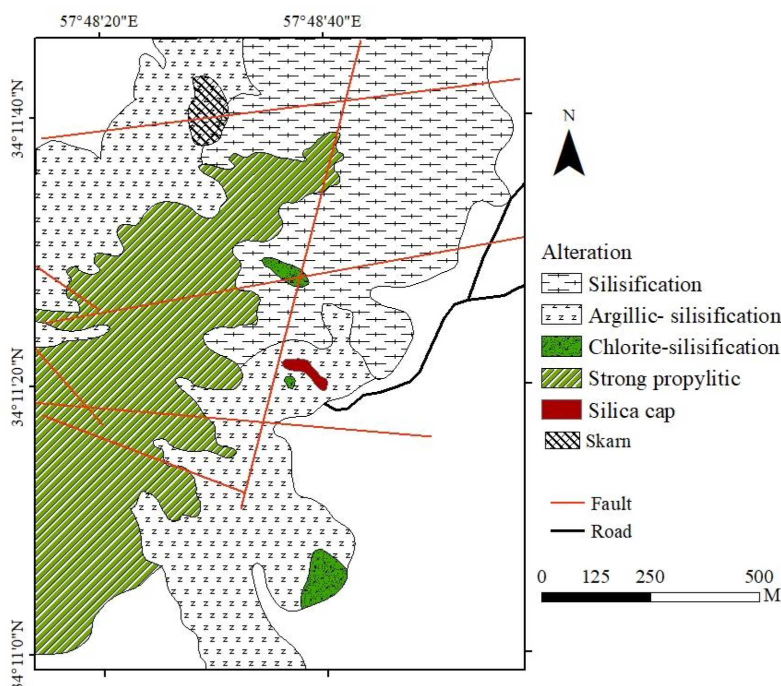
دگرسانی‌های پروپیلیتیک با شدت‌های مختلف، سیلیسی شدن و آرژیلیک در منطقه معدنی کجه رخ داده‌اند (شکل ۴). دگرسانی پروپیلیتیک با شدت زیاد در این منطقه بسیار گسترده است. واحد آندزیت و توده‌های نیمه عمیق منطقه دچار این دگرسانی شده‌اند. ترکیب کانی‌شناسی این دگرسانی در منطقه مورد بررسی شامل کلریت، اپیدوت، کلسیت و کانی کدر است. اپیدوت درون پلاژیوکلازها و همچنین بصورت پراکنده در زمینه دیده می‌شود. کانی‌های فرومنیزین در بعضی مقاطع بطور کامل به کلریت تبدیل شده‌اند، به طوری که از نام دگرسانی کلریتی در آن واحد استفاده شده است. کربنات درون پلاژیوکلاز، در زمینه و بصورت رگچه وجود دارد. سیلیسی‌شدن به‌صورت تشکیل کوارتز دیده می‌شود. این دگرسانی بیشتر پیرامون کانی‌سازی، همراه با اکسید آهن و همچنین بصورت پراکنده و رگچه‌ای درون واحدهای اتشفشانی منطقه دیده می‌شود. رخنمون کلاهک سیلیسی به شکل توده‌های سیلیسی بی‌قاعده و کلاهک‌های سیلیسی نهان‌بلور دانه‌ریز خاکستری تا شیری رنگ در سطح دیده می‌شود. مقدار سیلیس این بخش‌ها بیش از ۹۰ درصد است. توده‌های سیلیسی بی‌قاعده به صورت پهنه‌های باقی‌مانده در اندازه ۱۰ تا ۱۵ متر پراکنده در میان پهنه‌های دگرسانی آرژیلیک دیده می‌شوند. دگرسانی نوع اسکارنی در بخش شمالی منطقه رخنمون دارد و در سنگ آهک رخ داده است. بر پایه بررسی‌های نجفی و همکاران [۲۰]، این اسکارن‌ها از نوع کلسیمی هستند و کانی کلسیت، کانی اصلی کربناتی تشکیل دهنده آنهاست. کانی‌های اصلی این دگرسانی کلسیت، دولومیت، دیوپسید، اوژیت، گارنت، ولاستونیت و وزوویانیت بوده و همچنین رگه‌های درشت بلور کلسیت و ولاستونیت هستند.

کانی سازی

کانی‌سازی در منطقه به شکل اسکارن مجاورتی به دو صورت اندواسکارن و اگزواسکارن رخ داده است. پهنه اندواسکارن در توده نفوذی کوارتز دیوریت پورفیری دیده می‌شود و کانی‌های اسکارنی دیوپسید، تیتان - اوژیت، وزوویانیت و رگچه‌های کوارتز- دیوپسید وجود دارند و پهنه اگزواسکارن در واحد سنگ آهک رخ داده و از نوع کلسیمی و اکسایشی (حضور گارنت) است [۲۰]. کانی‌سازی اغلب به شکل پرکننده فضای خالی، جعبه ای، جانشینی، پراکنده در کوارتز، برش‌های گرمابی- گسلی درون رگه، گل کلمی و رگچه‌های تأخیری است (شکل ۵). کانی سازی اولیه براساس بررسی‌های صحرایی و مقاطع

[DOI: 10.61186/ijcm.32.2.275]

قطعه صیقلی شامل پیریت، گالن و اسفالریت است (شکل ۶). کانی‌سازی ثانویه که ناشی از اکسایش بوده، شامل کوولیت، مالاکیت، آزوریت، کریزوکولا، همی مورفیت و اکسیدهای آهن است. کانی‌های باطله اصلی کوارتز به همراه کلریت، اپیدوت، کانی‌های رسی و کانی‌های کربناتی هستند. با پراش پرتوی ایکس (XRD) ۶ نمونه کانسنگ نیز، کانی‌های سروزیت، گالن، همی مورفیت، آژوئیت، ویلمیت و میمتیت در نمونه‌های ماده معدنی تشخیص داده شدند (جدول ۱).

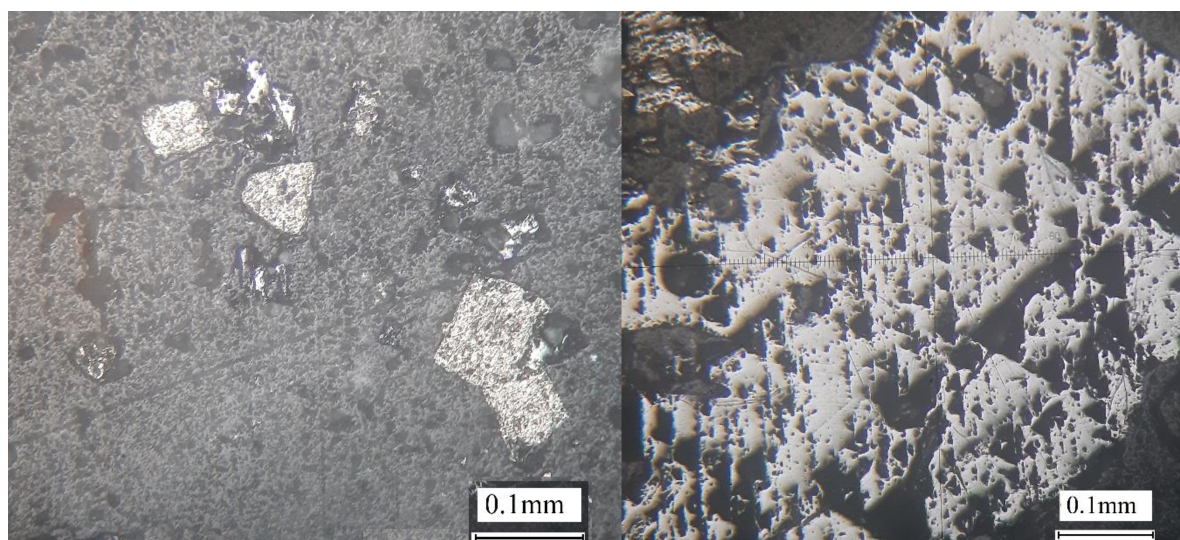


شکل۴ نقشه دگرسانی منطقه مورد بررسی کجه.



شکل۵ الف) برونزد صحرایی رگه دربردارنده کانی سازی در واحد کربناتی، ب) کانی‌سازی کریزوکولا بصورت پراکنده در کوارتز و پ) بافت جعبه‌ای همراه با کانی سازی کوارتز- مالاکیت- اکسیدهای آهن.

[DOI: 10.61186/ijcm.32.2.275]



شکل ۶ تصاویر میکروسکوپی از کانه‌سازی در منطقه مورد بررسی که کانی‌سازی سولفیدی گالن در تصویر سمت راست و کانی سازی پیریت در تصویر سمت چپ مشخص است.

جدول ۱ کانی‌های شناسایی شده بر اساس بررسی‌های پراش پرتو ایکس (XRD).

شماره نمونه	ترکیب کانی شناسی
۱	سروزیت، گالن، میمتیت
۲	همی مورفیت
۳	سروزیت، همی مورفیت، آژوئیت
۴	همی مورفیت، سروزیت، آژوئیت
۵	همی مورفیت، ویلمیت، آژوئیت
۶	همی مورفیت، آژوئیت

زمین شیمی

در بررسی‌های زمین شیمی، برپایه نتایج نمونه های تجزیه شده، عنصر روی به عنوان عنصر فلزی اصلی در رگه های معدنی کانسار کجه دارای عیار بیشینه ۱۴/۸ درصد، کمینه ۰/۲ درصد و میانگین ۴/۴ درصد است. عنصر سرب در این کانسار دارای عیار بیشینه ۱۰/۹ درصد، عیار کمینه ۰/۱ درصد و میانگین ۲/۱ درصد است (جدول۲).

بررسی سیال‌های درگیر

سنگ‌نگاری سیال‌های درگیر

ویژگی‌های سیال‌های درگیر اطلاعات سودمندی در مورد دمای تشکیل کانسارها، ترکیب سیال‌ها، الگوهای جریان سیال، خاستگاه کانی‌ها و سرانجام زمان رخدادهای گرمابی به دست می‌دهد [۱۸]. از این رو، در این پژوهش میانبارهای سیال موجود در کانی کوارتز کانسار به دقت بررسی شد.

بر اساس بررسی‌های سنگ‌نگاری مقاطع دوبر صیقل، سیال‌های درگیر در منطقه به‌صورت میانبارهای تک فازی بخار، دوفازی غنی از مایع و دو فازی غنی از گاز شناسایی گردید. میانبارهای تک فازی گازی اغلب به صورت پراکنده در زمینه، میانبارهای دوفازی غنی از مایع و دوفازی غنی از گاز اغلب به صورت انفرادی دیده می‌شوند.

از نظر زایشی، هر سه گروه میانبارهای سیال (اولیه، ثانویه و ثانویه کاذب) در نمونه‌های مورد بررسی دیده گردید. میانبارهای اولیه براساس شواهدی چون قرارگیری در پهنه‌های رشد بلور، توزیع تصادفی در سه بعد، مجزا بودن از میانبارهای سیال کناری و اندازه‌ی قابل توجه نسبت به کانی میزبان مشخص می‌شوند (شکل ۷ الف). گفتنی است که تنها با مشاهده شکل‌های بلوری منفی نمی‌توان به اولیه بودن آن‌ها نظر داد [۲۱]. میانبارهای ثانویه که بیشتر در ترک‌ها و شکستگی‌های کوچک درون بلورها گسترش یافته‌اند، به صورت

[DOI: 10.61186/ijcm.32.2.275]

تک‌ردیفی و چندردیفی در کنار هم مشخص هستند (شکل ۷ ب). میانبارهای سیال ثانویه کاذب به صورت ردیف‌هایی وابسته به میانبارهای سیال اولیه هستند و بر خلاف میانبارهای ثانویه، از ترک‌ها و شکستگی‌های موجود در کوارتز و کلسیت عبور نمی‌کنند (شکل ۷ ج).

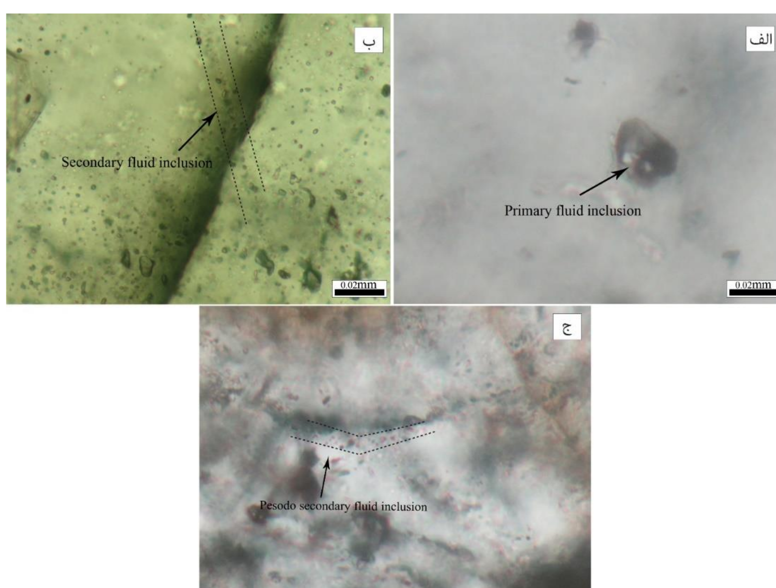
میانبارهای تک‌فازی گازی فراوانی زیادی دارند و اندازه آنها از ۲ تا به ندرت ۱۰ میکرون است. این میانبارها به دلیل گازی بودن، تیره رنگ هستند. آنها اغلب به صورت بیضوی و کشیده وجود دارند. این میانبارها به صورت همزیست با میانبارهای دوفازی دیده می‌شوند که نشان‌دهنده جوشش در محیط است (شکل ۸).

میانبارهای دو فازی غنی از مایع فراوانی مناسبی دارند. حجم فاز بخار در این میانبارها حدود ۱۰ تا ۳۰ درصد است. اندازه این میانبارها از ۵ تا ۲۵ میکرون تغییر میکند. این میانبارها بیشتر با شکل‌های بیضوی بیشتر دیده شدند (شکل ۹).

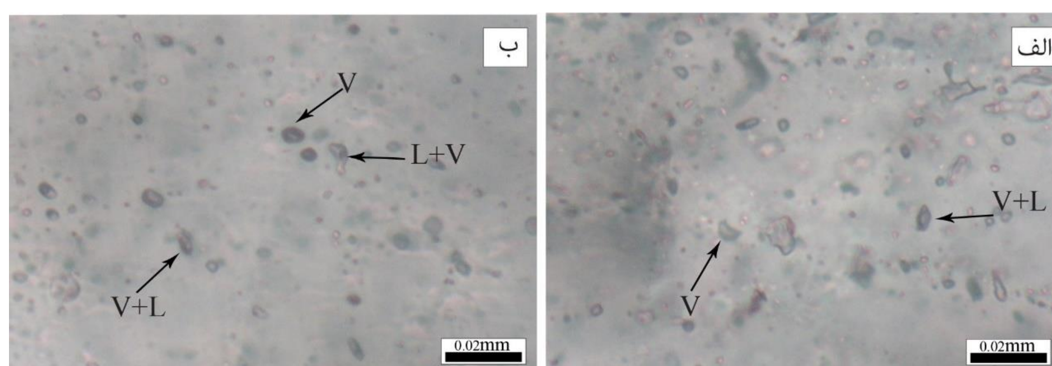
جدول ۲ خلاصه نتایج تجزیه شیمیایی نمونه‌های کانسار کجه.

عناصر (درصد)	میانگین	بیشینه	کمینه	کلارک[۲۲]
Zn	۴٫۴۰	۱۴٫۷۸	۰٫۱۶	۰٫۰۰۷
Pb	۲٫۱۴	۱۰٫۹	۰٫۱۲	۰٫۰۰۱۳

*Data from [۲۲]

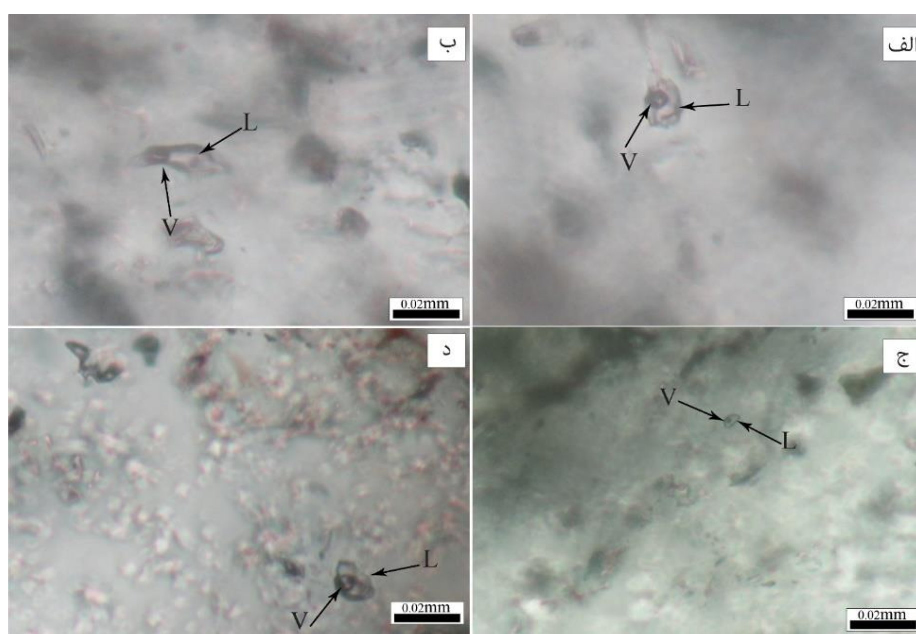


شکل ۷ الف) میانبار سیال اولیه، ب) میانبار سیال ثانویه و پ) میانبار سیال ثانویه کاذب



شکل ۸ الف) سیال درگیر تک فازی گازی، ب) همزیستی سیال‌های درگیر دو فازی غنی از گاز و مایع و تک فازی گازی که نشان دهنده جوشش است.

[DOI: 10.61186/ijcm.32.2.275]



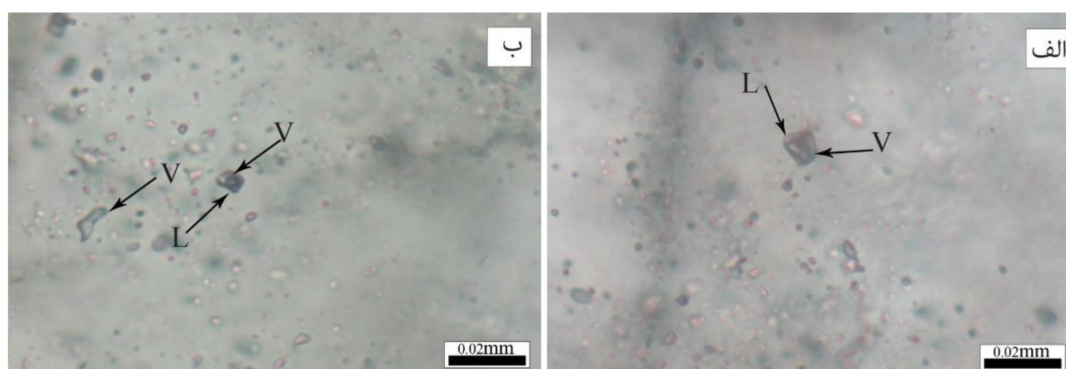
شکل ۹ سیال‌های درگیر دو فازی غنی از مایع.

در سیال درگیر دو فازی غنی از گاز حباب گاز گاهی بیش از ۷۰ درصد حجم سیال را فراگرفته است. فراوانی این نوع از میانبارهای سیال و همراهی آنها با نوع دوفازه غنی از مایع و تک فازی گازی نشان دهنده فرایند جوشش است [۲۱]. این میانبارها فراوانی کمی دارند و بیشتر به شکل نامنظم دیده می‌شوند. اندازه‌ی آنها حدود ۱۰ تا ۲۰ میکرون است (شکل ۱۰).

در سیال درگیر دو فازی گاز- مایع، دو فاز کاملا مجزای گازی غنی از CO_2 و H_2O قابل دیده می‌شوند. در تعدادی از نمونه‌های میان‌بارهای سیال بررسی شده، حضور مقادیر بالای CO_2 در فاز گازی موجب شده است تا بصورت دو فاز مخلوط نشدنی باشند (شکل ۱۱).

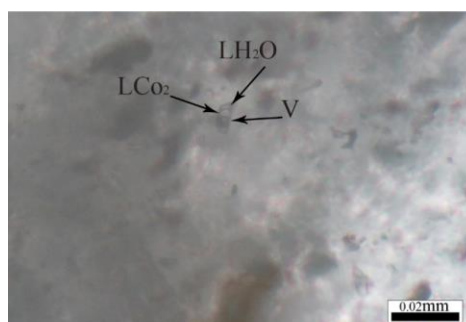
بحث

براساس نتایج ریزدماسنجی کانی کوارتز، دمای همگن‌شدگی برای سیال‌های درگیر نوع اولیه ۲۰۴ تا ۳۲۱ درجه سانتی‌گراد با میانگین ۲۸۳/۸ درجه سانتی‌گراد است (شکل ۱۲ الف) . نخستین دمای ذوب شدگی (Tfm) بین ۵۹/۷- تا ۴۰- درجه سانتیگراد است. نخستین دمای ذوب شدگی رابطه مستقیمی با ترکیب نمک موجود در سیال گرمابی دارد [۲۳]. بر اساس Tfm بدست آمده، نمک‌های $CaCl_2$ و NaCl در سیال های درگیر اولیه وجود دارند. مقدار Tm بین ۳/۸- تا ۱۲- درجه سانتیگراد است (جدول ۳). دمای ذوب آخرین بلور یخ نیز مقدار شوری را تعیین می‌کند.

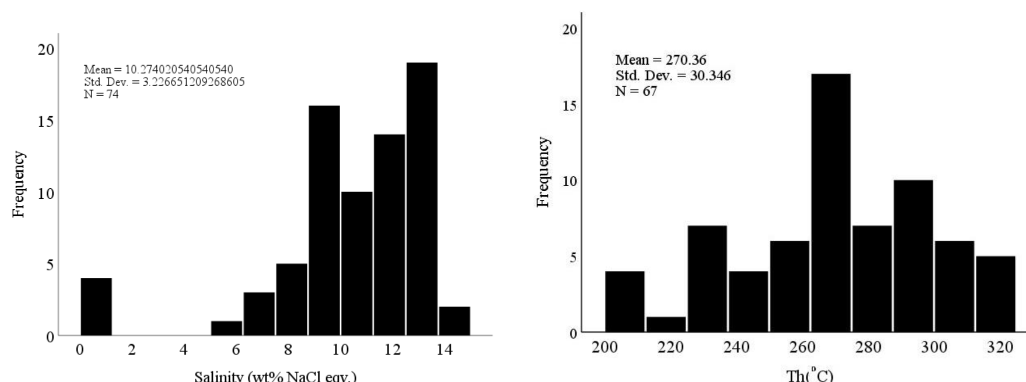


شکل ۱۰ سیال درگیر دو فازی غنی از گاز.

[DOI: 10.61186/ijcm.32.2.275]



شکل ۱۱ سیال درگیر دو فازی گاز- مایع (CO_2–مایع).



شکل ۱۲ الف) نمودار دمای همگن شدگی و ب) نمودار شوری (بر حسب درصد وزنی معادل نمک طعام) میانبارهای سیال در منطقه کجه.

جدول ۳ خلاصه داده‌های دماسنجی میانبارهای سیال اولیه کانی‌های کوارتز در منطقه کجه.

کانی میزبان	نوع میانبار	تعداد	گستره Th (°C)	Th (°C) متوسط	Tm-ice(°C) گستره	گستره شوری (wt%)	Mean (wt %) متوسط شوری
کوارتز	L+V	۶۲	۳۲۱-۲۰۴	۲۷۰/۳	-۳/۸ to -۱۲	۶/۲۷-۱۵	۱۰/۸۸
	V+L	۷	۳۱۶-۲۸۷	۳۰۷/۱۴	-۵to -۱۰/۲	۷/۸-۱۳/۵۶	۱۱/۰۸
	L+L+V	۵	۳۱۰-۲۲۹	۲۷۴/۱	-۵	۸	۸

براساس سامانه H_2O-NaCl [۱۶]، مقدار شوری برای سیال درگیر رگچه‌ها بین ۶/۲۷ تا ۱۵ با میانگین ۹/۹۸ درصد وزنی معادل نمک کلرید سدیم (NaCl) برآورد زده می‌شود (شکل ۱۲ ب). برای تعیین مسیر تکاملی سیال از نمودار دو متغیری شوری-دمای همگن‌شدگی [۱۸] استفاده شد (شکل ۱۳).

میان‌بارها روند نسبی تقریباً مسطحی نشان می‌دهند؛ بر اساس شکل ۱۳، تمایل نمونه‌ها از سمت شوری‌های کمتر به سمت شوری‌های بیشتر است و یک روند مسطح در نمونه‌ها دیده می‌شود. این را می‌توان با آمیختگی بین یک سیال با شوری کم و دمای بالا با یک سیال با شوری بالا و کمی سردتر (آمیختگی سیال دما بالا، ماگمایی، با محلول دما پایین، به احتمال بسیار آب‌های جوی، طی ادامه روند کانی‌سازی) و یا جوشش سیال (یا آمیختگی دو سیال گرمابی هم‌دما با شوری متفاوت) تفسیر کرد. وجود میان‌بارهای سیال دوفازی غنی از گاز و تک فاز گازی در کوارتزهای همراه با کانی‌سازی رخداد پدیده جوشش طی کانی‌سازی را نشان می‌دهد. دمای سامانه طی فرآیند جوشش تا زمان تبدیل کامل فاز مایع به بخار ثابت می‌ماند. در ادامه روند جوشش، فازهای مایع با شوری بالا و فازهای بخار با شوری کم شکل می‌گیرند. برای اطمینان از رخداد فرآیند جوشش باید ثابت نمود که درون میانبارها، فاز بخار همزیست در دمایی مشابه فازهای غنی از مایع همگن می‌شود [۲۳،۱۸].

اغلب برای به دست آوردن دمای واقعی تشکیل کانسار، فشار ستون چینه ای که در آن زمان روی کانی سازی بوده لازم است و باید روی دمای به دست آمده، تصحیح فشار صورت گیرد. البته، از آنجا که شواهد فرایند جوشش دیده می شود دمای همگن شدگی بدست آمده برای منطقه کانسار کجه می تواند همان دمای تشکیل کانسار باشد.

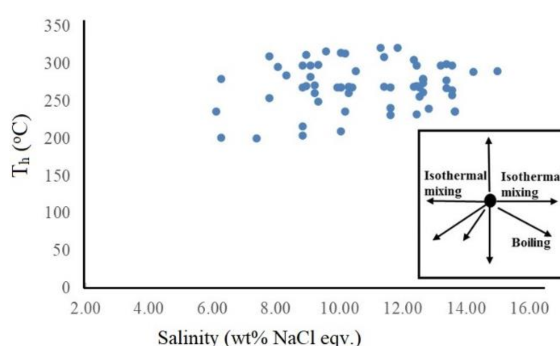
گستره دما و شوری در نمودار شوری نسبت به دمای همگن شدگی (شکل ۱۴) با کانسارهای مختلف مقایسه شده است [۲۴]. چنان که مشخص است، دما وشوری سیال‌های درگیر در

[DOI: 10.61186/ijcm.32.2.275]

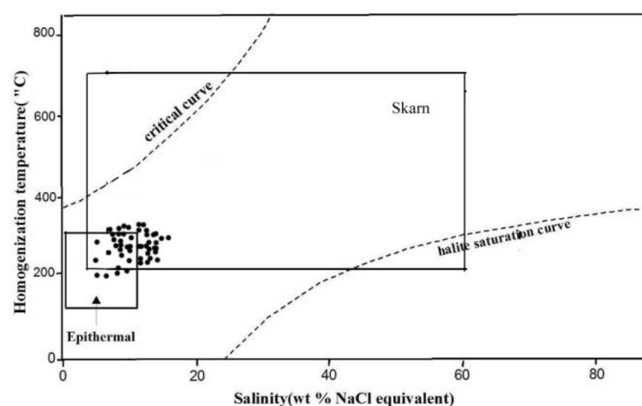
کانسار کجه مشابه کانسارهای فراگرمایی به سمت نوع اسکارن است.

برای تعیین خاستگاه سیال های کانه‌ساز موجود در میان-بارهای سیال، از نمودارمرجع [۲۴] استفاده شد. بر اساس نتایج به دست آمده، میان بارهای سیال در گستره خاستگاه سیال های دگرگونی و سیال های ترکیبی ماگمایی- جوی قرار دارند (شکل ۱۴). از آنجا که در منطقه مورد بررسی و پیرامون آن، دگرگونی رخ نداده، وجود سیال های با خاستگاه دگرگونی در محیط، دور از انتظار است.

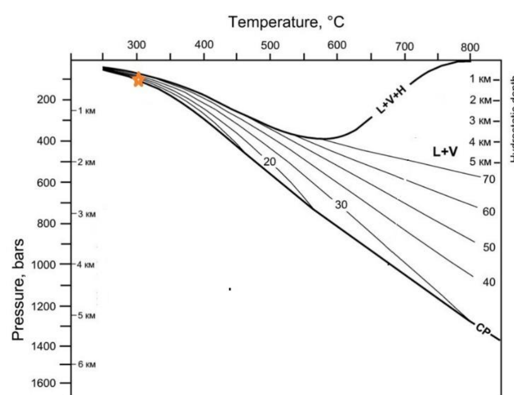
براساس شواهد پدیده جوشش، می توان عمق را برآورد کرد. از آنجا که فشار آنها طی به دام افتادن بسیار پایین است و نیازی به تصحیح ندارد [۲۴]، می‌توان عمق تشکیل آن را برآورد کرد که بر اساس نمودار مرجع [۲۵]، حدود ۵۰۰ تا ۷۰۰ متر است (شکل ۱۵).



شکل ۱۳ روندهای مختلف تکامل سیال در نمودار دما-شوری [۱۸].



شکل۱۴ موقعیت داده‌های ریزدماسنجی منطقه در نمودار شوری-دمای همگن شدگی (برگرفته از مرجع [۲۴] با کمی تغییر).



شکل ۱۵ نمودار دما -فشار -عمق برای سامانه H2O-NaCl [۲۶]، و محلول کانه دار منطقه کجه در آن، خط چین‌ها نشان دهنده مقدار شوری محلول هستند (هالیت =H ، بخار = V ، مایع = L).

[DOI: 10.61186/ijcm.32.2.275]

برداشت

از نظر زمین‌شناسی، در منطقه کجه، آهک کرتاسه قدیمی‌ترین سنگ این منطقه است. فعالیت‌های آتشفشانی به صورت آندزیت، بازالت-آندزیت، ریولیت و توف‌های ریولیتی– ریوداسیتی در مقاطع زمانی مختلف تکرار شده‌اند. توده‌های آذرین نیمه عمیق با طیف ترکیبی دیوریتی در سنگ‌های آتشفشانی نفوذ کرده‌اند. مجموعه پهنه‌های دگرسانی در منطقه شامل دگرسانی پروپیلیتیک با شدت‌های مختلف، سیلیسی و آرژیلیک هستند.

کانی سازی در منطقه کجه از نوع اسکارن و درون واحد کربناتی رخ داده است. بررسی‌های کانی‌شناسی حضور کانی-های پیریت، گالن و اسفالریت را نشان دادند که به شکل اولیه از سیال‌های کانه‌ساز تشکیل شده‌اند. از دیگر کانی‌های موجود می‌توان به کانی‌های ثانویه از جمله کوولیت، مالاکیت، آزوریت، کریزوکولا، همی مورفیت و اکسیدهای آهن تشکیل شده در اثر فرایند برونزایی اشاره کرد. نتایج تجزیه شیمیایی نمونه‌های کانسنگ نشان داد که عناصر روی و سرب بالاترین عیار را دارند و این کانسار را می‌توان یک کانسار روی و سرب بشمارآورد. نتایج اندازه‌گیری‌های دماسنجی نشان داد که در این کانی‌ها، سه دسته میانبار سیال نوع L+V با شوری کم تا متوسط (۶٫۲۷ تا۱۵ درصد وزنی نمک طعام) و گستره دمای همگن-شدگی ۲۰۴ تا ۳۲۱ درجه سانتی گراد، نوع V+L با شوری کم تا متوسط (۷٫۸ تا ۱۳٫۵۶ درصد وزنی نمک طعام) و گستره دمای همگن‌شدگی ۲۸۷ تا ۳۱۶ درجه سانتی گراد و میانبار سیال نوع L+L+V با شوری کم تا متوسط (۸ درصد وزنی نمک طعام) و گستره دمای همگن‌شدگی ۲۲۹ تا۳۱۰ درجه سانتی گراد، وجود دارد. همزیستی سیال‌های درگیر دوفازی غنی از مایع و غنی از بخار در کوارتز همراه با کانی‌سازی، نشاندهنده رخداد پدیده جوشش در زمان تشکیل کانی‌سازی است [۲۶]. جوشش زمانی رخ می‌دهد که یک سیال تک فاز با شوری بالا به حالت دوفازی روی نقطه طرف مایع منحنی بحرانی می‌رسد. در این حالت، تعدادی فاز بخار با شوری کمتر از آن جدا شده و باعث تولید حباب می‌گردد [۲۷]. رخ دادن پدیده جوشش باعث تغییراتی در شرایط فیزیکوشیمیایی محلول کانه‌دار چون کاهش دما و افزایش pH می‌گردد که لازمه ته‌نشست فلزها و ناپداری کمپلکس‌ها و تشکیل کانی است [۲۸].

قدردانی

نویسندگان مقاله از همکاری بهره بردار معدن آقای عباس طاهری طاهرآباد و جناب آقای مهندس ایمان طلب معاون امور معادن و صنایع معدنی سازمان صمت خراسان جنوبی تشکر می نمایند.

مراجع

[1] Karimpour M.H., Malekzadeh Shafaroudi A., Farmer G.L., Stern C.R., *"Petrogenesis of Granitoids, U-Pb zircon geochronology, Sr-Nd Petrogenesis of granitoids, U-Pb zircon geochronology, Sr-Nd isotopic characteristics, and important occurrence of Tertiary mineralization within the Lut block, eastern Iran"*, Journal of Economic Geology 1(6) (2012) 1-27. DOI:10.22067/econg.v4i1.13391.

[2] Malekzadeh A., *"Geology, mineralization, alteration, geochemistry, microthermometry, isotope studies and determining the mineralization source of Khoopic and Maherabad exploration areas"*, (2009) Ph.D thesis, Ferdowsi University of Mashhad.

[3] Moradi M., Karimpour M.H., Farmer L.G., Stern C.R., *"Rb-Sr & Sm-Nd Isotopic Composition, U-Pb- Th (zircon) Geochronology and Petrogenesis of Najmabad granodiorite batholith eastern Iran"*, Journal of Economic Geology 3(2) (2011) 127-145. [DOI: 10.22067/econg.v3i2.11436].

[4] Arjmandzadeh R., Karimpour M.H., Mazaheri S.A., Santos J.F., Medina J.M., Homam S.M., *"Sr–Nd isotope geochemistry and petrogenesis of the Chah- Shaljami granitoids (Lut Block, eastern Iran) "*, Journal of Asian Earth Sciences 41(3) (2011) 283-296. [DOI:10.1016/j.jseaes.2011.02.014].

[5] Karimpour M.H., *"Comparison of Qaleh Zari Cu–Au–Ag deposit with other iron oxides Cu–Au (IOCG-Type) deposits & new classification"*, Iranian Journal of Crystallography and Mineralogy (13) (2005) 165–184.

[6] Karimpour M.H., Stern C.R., *"Advance spaceborne thermal emission and reflection radiometer (ASTER) mineral mapping to discriminate high sulfidation, reduced intrusion related, and iron oxide gold deposits, eastern Iran"*, Applied Sciences 9 (2009) 815–825. [DOI: 10.3923/jas.2009.815.828].

[7] Malekzadeh Shafaroudi A., Karimpour M.H., Stern C.R., *"Zircon U–Pb dating of Maherabad porphyry copper–gold prospect area: evidence for a late Eocene porphyry- related metallogenic epoch in east of Iran"*, Journal of Economic Geology 3(1) (2011) 41–60 (in Persian with English abstract). [DOI:10.22067/econg.v3i1.11439].

[8] Malekzadeh Shafaroudi A., Karimpour M.H., Golmohammadi A., *"Zircon U–Pb geochronology and petrology of intrusive rocks in the C-North and Baghak districts, Sangan iron mine, NE Iran"*,

Journal of Asian Earth 64(5) (2013) 256-271. [DOI: 10.1016/j.jseaes.2012.12.028].

[9] Malekzadeh Shafaroudi A., Karimpour M.H., Stern C.R., *"The Khopik porphyry copper prospect, Lut Block, Eastern Iran: Geology, alteration and mineralization, fluid inclusion, and oxygen isotope studies"*, Ore Geology Reviews 65 (2) (2015) 522–544. [DOI:10.1016/j.oregeorev.2014.04.015].

[10] Richards J.P., Spell T., Rameh E., Razique A., Fletcher T., *"High Sr/Y magmas reflect arc maturity, high magmatic water content, and porphyry Cu ± Mo ± Au potential: examples from the Tethyan arcs of Central and Eastern Iran and Western Pakistan"*, Economic Geology 107 (2) (2012) 295–332.[DOI:10.2113/econgeo.107.2.295].

[11] Esmaeily D., Nedelec A., Valizadeh M.V., Moore F., Cotton J., *"Petrology of the Jurassic Shah-kuh granite (eastern Iran), with reference to tin mineralization"*, Journal of Asian Earth Sciences 25 (2005) 961-980 [DOI: 10.1016/j.jseaes.2004.09.003].

[12] Miri Beydokhti R., Karimpour M.H., Mazaheri S.A, *"Studies of remote sensing, geology, alteration, mineralization and geochemistry of Balazard copper-gold prospecting area, west of Nehbandan"*, Iranian Journal of Crystallography and Mineralogy, 22(3) (2014) 459-470. (in Persian with English abstract).

[13] Zirjanizadeh S., Samiee S., *"Evidences of epithermal mineralization at Bidook gold vein deposit (east of Iran), based on geology, alteration, mineralization, geochemistry and thermometery data"*, Iranian Journal of Crystallography and Mineralogy 28(4) (2020) (907-920).

[14] Samiee S., Karimpour MH., . Ghaderi M., Heidarian Shahri M. R., , Klöetzli U., Santos J.F., *"Petrogenesis of subvolcanic rocks from the Khunik prospecting area, south of Birjand, Iran: Geochemical, Sr–Nd isotopic and U–Pb zircon constraints"*, Journal of Asian Earth Sciences, 115(2016) 170-182. [DOI:10.1016/j.jseaes.2015.09.023]

[15] Najafi A., Karimpour M.H., Ghaderi M., Stern C.R., Farmer G.L., *"U-Pb zircon geochronology, Rb-Sr and Sm-Nd isotope geochemistry, and petrogenesis of granitiod rocks at Kaje prospecting area, northwest Ferdows: Evidence for upper Cretaceous magmatism in Lut block"*, Journal of Economic Geology 6(1)(2014) 107-135. [DOI:10.22067/econg.v6i1.24415].

[16] Steele-MacInnis, M., Bodnar, R.J. Naden, J., *"Numerical model to determine the composition of H2O–NaCl–CaCl2 fluid inclusions based on microthermometric and microanalytical data"*, Geochimica et Cosmochimica Acta, 75(1) (2011)21-40.[DOI:10.1016/j.gca.2010.10.002].

[17] Roedder E., *“fluid inclusions",* Reviews in Mineralogy & Geochemistry 12(1984) 646p. [DOI:10.1515/9781501508271].

[18] Shepherd T. J., Rankin A. H., M Alderton D. H., *"A practical guide to fluid inclusion studies"*, New York, Blackie, (1985) 239p.

[19] Aghanabati S. A., *"Geology of Iran, Geological Survey of Iran"*, Tehran(2004), 586p

[20] Levinson A.A., *"Introduction to Exploration Geochemistry"*, (Applied Publishing: Calgary), 1980, 612 p.

[21] Lu H.Z., Fan H.R., Ni P., Ou G.X., Shen K., Zhang W. H., *"Fluid Inclusions"*, Science Press, Beijing, (2004)1–487 (in Chinese with English abstract).

[22] Simmons S.F., Arehart G., Simpson M. P., Mauk J.L., *"Origin of Massive Calcite Veins in the Golden Cross Low-Sulfidation, Epithermal Au-Ag Deposit, New Zealand"*, Economic Geology 95 (1)(2000) 99–112. [DOI:10.2113/gsecongeo.95.1.99].

[23] Wilkinson J. J., *"Fluid inclusions in hydrothermal ore deposits"*, Lithos 55 (1-4)(2001) 229-272. [DOI: 10.1016/S0024-4937(00)00047-5]

[24] Beane R. E., *"The Magmatic–Meteoric Transition"*, Geothermal Resources Council, Special Report 13(1983) 245–253.

[25] Fournier R. O., *"Hydrothermal processes related to movement of fluid from plastic into brittle rock in the magmatic-epithermal environment"*, Economic Geology 94(8) (1999) 1193–1211. [DOI: 10.2113/gsecongeo.94.8.1193].

Drummond, S. E., and Ohmoto, H., 1985- Chemical evolution and mineral deposition in boiling hydrothermal systems. Economic Geology 80, 126–147.

[26] Roeder E., Bodnar R.J., *"Fluid inclusion studies of hydrothermal ore deposits"*, In: Barnes H. L. (ed) Geochemistry of Hydrothermal Ore Deposits 3rd edition. NewYork, NY: John Wiley, (1997) 657-697.

[27] Ulrich T., Günther D., Heinrich C.A., *"The Evolution of a Porphyry Cu-Au Deposit, Based on LA-ICP-MSAnalysis of Fluid Inclusions: Bajo de la Alumbrera, Argentina"*, Economic Geology 96 (8) (2001) 1743–1774. [DOI:10.2113/gsecongeo.96.8.1743].

[28] Sillitoe R.H., *"Porphyry Copper Systems"*, Economic Geology 105 (1) (2010) 3–41. [DOI:10.2113/gsecongeo.105.1.3].